

Skimming flow の空気混入流特性に対する水路傾斜角度の影響

日本大学大学院理工学研究科
日本大学理工学部
日本大学理工学部

学生員 〇笠原 政人
正会員 高橋 正行
フェロー会員 大津 岩夫

はじめに

堰, ダムなどの落差を有する構造物や急傾斜地に設置された水路を流下する高速流を傾斜面上で減勢させる方法として階段状水路は有効である^{1),2)}。階段状水路での流れは空気混入流となるため, 空気混入流の空気混入率, 流速, およびエネルギーを知ることは水工設計上重要である。Skimming flow の場合, Boes and Hager³⁾は水路傾斜角度 $\theta=30^\circ$, 50° を対象に, Chanson⁴⁾は $\theta=15.9^\circ$ を対象に空気混入率 C および流速 u の検討を行っているが, 空気混入率 C と流速 u の分布に対する水路傾斜角度と相対ステップ高さの変化に関する考察はなされていない。ここでは水路傾斜角度 $\theta=19^\circ$, 55° の平衡状態における Skimming flow を対象に $0.2 \leq S/d_c \leq 1.0$ [S :ステップ高さ, d_c :限界水深] の条件の下で, 空気混入率分布と流速分布を明らかにした。また, 空気混入率および流速を用いて空気混入射流のエネルギー水頭 E を算定した。さらに, 水路傾斜角度と相対ステップ高さが空気混入射流の空気混入率, 流速, およびエネルギーにおよぼす影響を示した。

実験条件

実験は平衡状態 (各ステップ上で同じ流況が繰り返して形成される状態) を対象に表1の実験条件のもとで実施した。なお, θ は水路傾斜角度, S はステップ高さ, d_c は限界水深 [$d_c=(q_w^2/g)^{1/3}$; g :重力加速度; q_w :水の単位幅流量], S/d_c は相対ステップ高さ, H_s はクレスト頂部から測定位置までの落差, Re はレイノルズ数 [$Re=q_w/\nu_w$; ν_w :水の動粘性係数], y は仮想底面からの垂直距離である。空気混入率 C [C =空気の体積/(空気の体積+水の体積)] と空気混入射流の流速 u については二点電極型ボイド率計を用い, 図1に示す測定断面において計測した。また, 測定断面では平行流が生じていることは確認している。なお, $y_{0.9}$ は aerated flow depth であり $C=0.9$ に対応する y の値である。

空気混入射流の空気混入率分布および流速分布

平衡状態における Skimming flow において, $Re \geq 3.0 \times 10^4$ の空気混入率 C は次の関係で示される⁵⁾。

$$C = F\left(\frac{y}{y_{0.9}}, \frac{S}{d_c}, \theta\right) \quad (1)$$

(1)式の関係を用いて空気混入率 C の実験値を整理した一例を図-2に示す。図-2a)に示されるように $\theta=55^\circ$ のとき, S/d_c が大きくなると空気混入率 C は $0.1 < y/y_{0.9} < 0.8$ の範囲で幾分か大きくなる。また, 図-2b)に示されるように与えられた S/d_c に対して θ を大きくすると $y/y_{0.9} < 0.8$ の範囲で空気混入率 C は大きくなる。これは θ が大きくなると乱れが大きくなり, 水面から混入した空気が底面付近まで多く輸送されるためと考えられる。Chanson によって提案されている気泡の拡散モデル⁶⁾より求めた空気混入率分布を図-2a), b)に示す。図に示されるように, Skimming flow の空気混入率分布は気泡の拡散モデルによって近似できる。

平衡状態における Skimming flow において, $Re \geq 3.0 \times 10^4$ の流速は次の関係で示される⁵⁾。

$$\frac{u}{u_{0.9}} = F\left(\frac{y}{y_{0.9}}, \frac{S}{d_c}, \theta\right) \quad (2)$$

表-1 実験条件

θ [degree]	S [cm]	S/d_c	H_s/d_c	Re [$\times 10^4$]
19	1.25~5.0	0.3~1.0	14.5~48.0	3.0~8.6
55	1.25~5.0	0.2~1.0	32.3~44.3	3.0~9.1

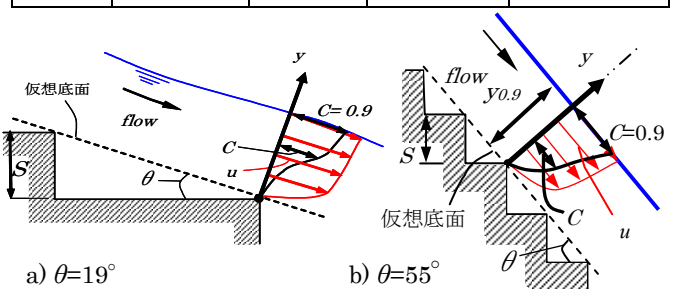


図-1 定義図

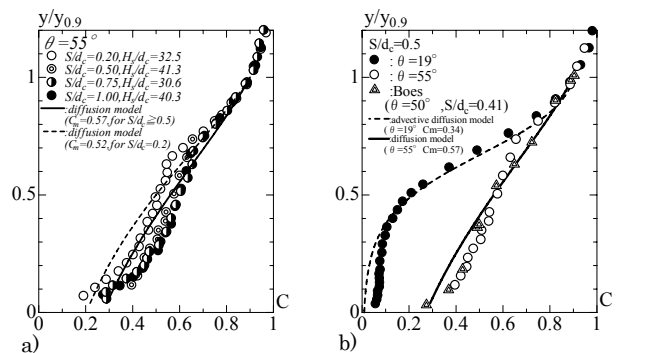


図-2 空気混入射流の空気混入率分布

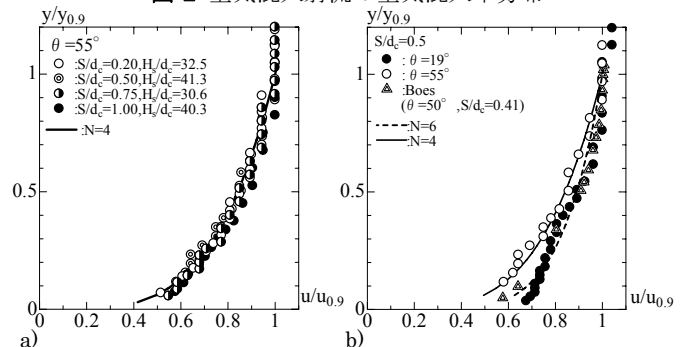


図-3 空気混入射流の流速分布

キーワード：階段状水路, Skimming flow, 空気混入射流, 空気混入率, 流速, エネルギー

連絡先：〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8, Tel. & Fax.: 03-3259-0668

$u/u_{0.9}$ を (2) 式の関係で整理した一例を図-3a)に示す. また, *Skimming flow* の場合, (2) 式の関係で整理すると (3) 式で示される $1/N$ 乗則で流速分布が近似できる.

$$\frac{u}{u_{0.9}} = \left(\frac{y}{y_{0.9}} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (3)$$

図-3a)に示されるように $\theta=55^\circ$ の場合, $0.2 \leq S/d_c \leq 1.0$ の範囲において流速分布は $1/4$ 乗則(図中の実線)で近似できる. また, 与えられた S/d_c に対して, θ の変化による流速分布の違いの一例を図-3b)に示す. 図に示されるように, $S/d_c=0.5$ の場合, 流速分布は $\theta=55^\circ$ では $1/4$ 乗則(図中の実線)で近似され, $\theta=19^\circ$ では $1/6$ 乗則(図中の破線)で近似される. これは水路傾斜角度が変化するに伴い, ステップ水平面上に形成される *impact region*(衝突領域(図-4))の影響のため, 流速分布形状が変化したものと考えられる.

Skimming flow のエネルギー水頭

Skimming flow を対象にした空気混入流のエネルギー評価方法は Ohtsu et al.によって提案されている²⁾. エネルギー水頭 E を clear water depth d_w および断面平均流速 V_w [$=q_w/d_w$; $d_w = \int_0^{y_{0.9}} (1-C)dy$] で表すと, 補正係数 C_p および C_v を用いて (4) のように示される.

$$E = C_p d_w \cos \theta + C_v \frac{V_w^2}{2g} \quad (4)$$

図-5 に空気混入流のエネルギー水頭 E と clear water のエネルギー水頭 E_w との比を示す. ここで, E_w は clear water のエネルギー水頭であり, (4) 式において $C_p=1$, $C_v=1$ とおいた (5) 式で示される.

$$E_w = d_w \cos \theta + \frac{V_w^2}{2g} \quad (5)$$

図-5a)に示されるように, $0.2 \leq S/d_c \leq 1.0$ においては $\theta=55^\circ$ の場合, S/d_c の E/E_w への影響は小さく, $1.2 \leq E/E_w \leq 1.3$ の範囲にある. 図-5b)に示されるように, 与えられた S/d_c に対して θ を大きくすると E/E_w の値は幾分大きくなる. これは補正係数 C_v が θ の増加によって大きくなったためと考えられる.

まとめ

水路傾斜角度 $\theta=19^\circ$, 55° の $0.2 \leq S/d_c \leq 1.0$ の範囲において, 水路傾斜角度 θ と相対ステップ高さ S/d_c が空気混入射流の内部特性におよぼす影響について得られた結果を以下に示す.

- 与えられた水路傾斜角度 θ に対して相対ステップ高さ S/d_c を大きくすると, 空気混入率 C は幾分大きくなる. 与えられた S/d_c に対して θ を大きくすると, 空気混入率 C は大きくなる.
- $\theta=19^\circ$, 55° の平衡状態における *Skimming flow* の流速分布を明らかにした. 与えられた θ に対して S/d_c の変化による流速分布形状への影響は小さい. 与えられた S/d_c に対して θ を変化させると, 流速分布形状は変化し, $\theta=19^\circ$ では $1/6$ 乗則, $\theta=55^\circ$ では $1/4$ 乗則で近似される.
- 空気混入射流のエネルギー水頭 E と clear water のエネルギー水頭 E_w との関係を明らかにした. E/E_w の S/d_c による変化は小さい. 与えられた S/d_c に対して θ を大きくすると, E/E_w は幾分大きくなる.

参考文献

- Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of flow conditions on stepped channels, Proc.27th IAHR Congress, IAHR, Madrid, Spain, Theme D, pp.583-588, 1997.
- Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: Flow characteristic of skimming flows in stepped channels, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.130, No.9, pp.860-869, 2004.
- Boes, R.M.: Zweiphasenströmung und Energieumsetzung auf Grosskaskaden., Ph. D thesis, ETH, Zürich, Switzerland, 2000, (In German).
- Yasuda, Y. and Chanson, H.: Micro-and Macro-Scopics Study of Two-Phase Flow on A Stepped Chute, Proc.30th IAHR Congress, IAHR, Madrid, Spain, pp.695-702, 2003.
- 高橋, 安田, 大津,: 階段状水路における空気混入射流の特性に対するレイノルズ数の影響, 水工学論文集, 土木学会, 第 50 巻, pp.871-876, 2006.
- Chanson, H.: The hydraulics of stepped chutes and spillways, Balkema, Lisse, The Netherlands, 2001.

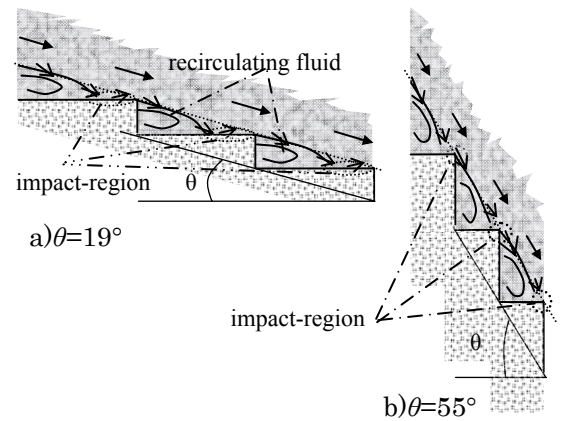


図-4 衝突領域との形成状況

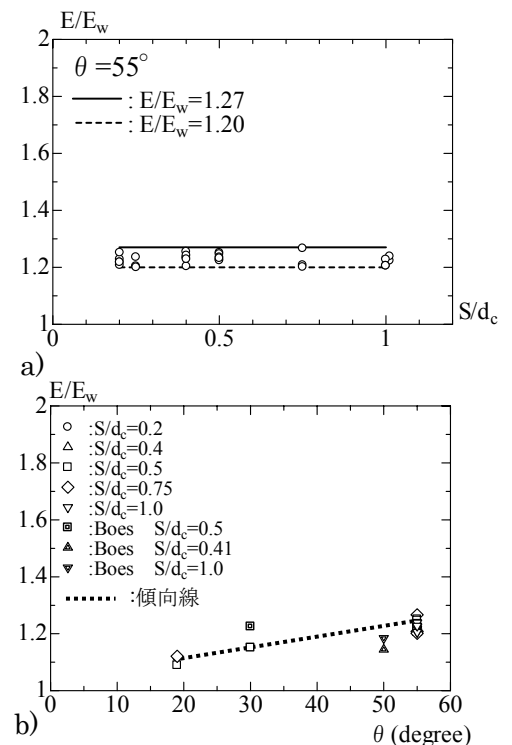


図-5 空気混入流のエネルギー